

## **FRAKTAL GEOMETRİ İLE MODELLENMİŞ PÜRÜZLÜ YÜZEY İLE TEMAS EDEN YARI-SONSUZ ORTAMIN MEKANİK DAVRANIŞI**

**Alaattin ÖZER<sup>1</sup> ve Hasan SOFUOĞLU<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Yrd. Doç. Dr., Bozok Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Yozgat.  
aozer@erciyes.edu.tr

<sup>2</sup> Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Trabzon.  
sofuoglu@ktu.edu.tr

### **ÖZET**

Bu çalışmada, yüzey pürüzlülüğünün temas basıncı, şekil değiştirme ve gerilmeler üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla; pürüzlü yüzey ile yarı-sonsuz ortamın temas analizi sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, fraktal geometri ile modellenmiş rijit pürüzlü yüzeyin homojen, elastik-tam plastik pürüzsüz yarı-sonsuz ortam ile normal teması için 2-boyutlu bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Mekanik yüzey yüklerinin yarı-sonsuz ortamda oluşan von Mises eşdeğer gerilmesi, elastik-plastik şekil değiştirmeleri ile temas basınç değerleri üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Ayrıca, rijit pürüzlü yüzeyin yarı-sonsuz ortam içindeki temas derinliği miktarının (girişim) şekil değişimine etkisi de incelenmiştir. Fraktal geometri kullanarak geliştirilen ve böylece pürüz etkileşimlerinin de dikkate alındığı daha gerçekçi bu yüzey modelinin, gerilme ve şekil değiştirme dağılımları üzerindeki etkisi diğer modellerle karşılaştırmalı olarak irdelenerek geçerliliği araştırılmıştır. Fraktal geometri kullanarak yapılan analizler sonucunda gerilme, şekil değiştirme ve basınç değerleri için elde edilen dağılımların diğer yüzey modellerine göre daha gerçekçi olduğu görülmüştür.

### **ABSTRACT**

In this study, normal contact analysis of a rough surface with a semi-infinite medium was performed by finite element method in order to investigate effect of surface roughness on to the distributions of contact pressure, stress and strain. A 2-dimensional finite element model was developed for normal contact of rigid rough surface modeled by fractal geometry with a smooth elastic-perfectly plastic semi-infinite medium. Effects of mechanical surface loadings on to von Mises equivalent stress, equivalent plastic strain and contact pressure have been determined. Effect of interference on to deformation was also investigated. The rough surface model developed by using fractal geometry and, hence, taken asperity interaction into account

was investigated by comparing the others for its validity. Based on the presented results obtained from the fractal surface model, it has been shown that the distributions of the stress, the strain and the contact pressure were more realistic than those of other surface models.

## 1. GİRİŞ

Pratikte, pürüzsüz yüzeylerin elde edilişinin çok zor, hatta kendi molekül yapısıyla karşılaştırıldığında, büyük bir özenle parlatılan yüzeylerde bile malzemenin çok büyük ve farklı ölçekte pürüzlere sahip olduğu bilinmektedir. İki pürüzlü yüzey birbiriyle temas ettiğinde, yüzeylerinin ne kadar düzgün olduğundan bağımsız olarak, pürüz uçları elastik ve plastik olarak şekil değişimine uğrar ve temas, görünen temas alanının belli bir oranında gerçekleşir [1]. Pürüzlü bir yüzeyin geometrik yapısının rastlantısal (random) bir dağılıma sahip olduğu ve bu yüzeydeki pürüzlerin, örnek uzunluğundan atom boyutuna kadar çok geniş ölçekte değerler aldığı bilinmektedir [2]. Temas eden pürüzlü cisimlerin tribolojik ve/veya mekanik analizlerini yapabilmek için bu çok ölçekli pürüzlü yüzeylerin geometrik yapısının uygun ve doğru bir şekilde modellenmesi gerekmektedir. Günümüzde artık geçerliliğini kaybetmekte olan geleneksel yöntemler, istatistiki bir yaklaşım örneğin yükseklik varyansı (rms), eğim ve eğrilik gibi parametreler kullanarak yüzeyi karakterize etmektedirler [3,4]. Oysa bu değerlerin büyük ölçüde, pürüz ölçümünü yapan cihazın hassasiyetine ve örnek uzunluğuna bağlı olduğu bilinmektedir [5,6].

## 2. YÜZEY MODELLEME

Temelde doğadaki bir dizi obje veya doğal olay Euclid geometrisiyle karakterize edilemeyen düzensizliği gösterir ve onları tasvir etmek için çok küçük boyutlar gerekir. Pürüzlü yüzey bunlardan biridir. Eğer bir pürüzlü yüzey artan bir biçimde büyütülürse, pürüzlülüğün artan detayları görünmeye devam eder ve profil asla düzgün olmaz. Pürüz mikrotemasının değişik boyutlarından bakıldığında, temas ara yüzeylerindeki gerçek gerilme ve şekil değiştirme dağılımlarını elde etmenin yüzey pürüzlülüklerinin gerçekçi modellenmesine bağlı olduğu görülür. Çeşitli yüzeyler üzerindeki pürüzlülük ölçümleri, yüzey profil spektrumunun üstel kuralına uyduğunu göstermiştir. Yani, bir yüzey ardışık olarak büyütülerek pürüzlerin detayları arttırıldığında, büyütülmüş yüzeyin orijinal yüzeye çok benzediği görülmektedir. Bu ise matematiksel olarak kendine-benzerlik (self-similarity) ve kendine-yakınlık (self-affinity) özellikleriyle ifade edilebilmektedir. Fraktal geometrinin esasını teşkil eden fraktal boyut, hem skalası-değişmeyen hem de kendine-benzerlik ve kendine-yakınlık [7] özelliklerini bünyesinde taşımaktadır. Böylece, bu özelliklere sahip fraktal geometri kullanılarak yüzeyin çok ölçekli pürüzlü yapısı modellenebilmektedir.

Yüzeylerin sahip oldukları çok ölçekli pürüzlülükleri sebebiyle gerçek temas, pürüz teması olarak adlandırılan yüzey çıkıntılarının uçlarında meydana gelir. Manyetik depolama aygıtlarındaki okuyucu kafa-disk ara yüzeyi, deforme olabilen düzgün bir yüzeyin rijit pürüzlü fraktal bir yüzey ile teması şeklinde gösterilebilir. Yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için geleneksel yaklaşımlarda kullanılan örnek uzunluğu, ölçü aleti çözünürlüğü ve istatistiksel parametrelerin ölçümünde deney aletinin etkisi bilindiği için, bu çalışmada mühendislik yüzeylerini çok daha gerçekçi olarak modellemek amacıyla bütün bu olumsuzlukları bertaraf eden fraktal geometri kullanılmıştır. Yüzey karakterizasyonu için skaladan-bağımsız

parametreler kullanan fraktal geometriden [7] yararlanmak avantaj sağlar. Çünkü bu yöntem, yüzey topografisi parametrelerinin ölçümünde, ölçü aletinin hassaslığı gibi olumsuz etkilerini bertaraf eder. Fraktal davranış gösteren pürüzlü yüzeylerin iki-boyutlu temas mekaniği analizlerinde kullanılan yüzey profili Weierstrass-Mandelbrot (W-M) fonksiyonu ile temsil edilir.

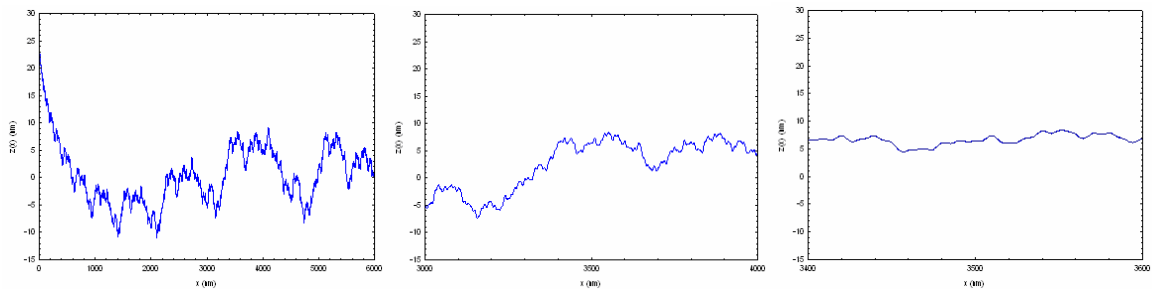
Son yıllarda bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler sayısal yöntemlerin mühendislik problemlerine uygulanmasını artırmıştır. Günümüzde mühendislikte karşılaşılan birçok problemin çözümünde olduğu gibi değişik temas yükleri nedeniyle oluşan gerilmeler ve şekil değiştirmeler için çözümler elde etmek amacıyla temas problemlerinde kullanılan en yaygın ve etkin yöntemlerden biri sonlu elemanlar yöntemidir (SEY).

Fraktal geometri kullanan ve okuyucu kafa-disk ara yüzeyinin bir eşdeğer yüzey topografisini SEY ile modelleyen Komvopoulos [8], kafa-disk ara yüzeyinin ince film şeklindeki rijit disk ortamında oluşan gerilme ve şekil değiştirme alanlarının karbon kaplama kalınlığı ve maksimum yüzey girişimi mesafesi cinsinden analizini yapmıştır. Komvopoulos ve Ye [9] manyetik kayıt ortamlarındaki (hard-disk) okuyucu kafa-rijit disk ara yüzeyinin gerçek topografisini hesaba katan ve fraktal geometri ile karakterize edilen bir elastik-plastik sonlu elemanlar modelini oluşturmuştur.

Fraktal davranış gösteren pürüzlü yüzeylerin iki-boyutlu temas mekaniği analizlerinde ile aşağıdaki gibi verilmiştir [10-14]:

$$z(x) = L \left( \frac{G}{L} \right)^{D-1} \sum_{n=0}^{n_{\max}} \frac{\cos \left( \frac{2\pi \gamma^n x}{L} \right)}{\gamma^{(2-D)n}} \quad (1)$$

Burada L fraktal örnek uzunluğu; G fraktal pürüzlülük; D fraktal boyut ( $1 < D < 2$ );  $\gamma$ , yüzey profilindeki frekansların yoğunluğunu kontrol eden bir parametre (tipik olarak  $\gamma=1.5$  [14]), ve  $n$  ise  $n_{\max} = \text{int}[\log(L/L_s)/\log\gamma]$  ile verilen frekans indisidir. Buradaki  $L_s$  ise kesim uzunluğudur. Fraktal pürüzlülük G, frekanstan bağımsız olan bir yükseklik ölçü parametresidir. Fraktal boyut D' nin büyüklüğü  $z(x)$  yüzey fonksiyonundaki yüksek ve düşük frekans bileşenlerinin katkılarını belirler. (1) eşitliğiyle verilen fonksiyon gerçek yüzeylere benzeyen yüzey topografilerinin simülasyonu için uygun olup D ve G fraktal parametreleri deneysel olarak belirlenebilirler.  $z(x)$  fonksiyonuyla verilen profil, bir isotropik ve homojen pürüzlü yüzeyin istatistikçe geçerli bir yeniden sunumudur.



Şekil 1. Analizlerde kullanılan rijit fraktal pürüzlü yüzeyin belirlenmesi aşamaları.

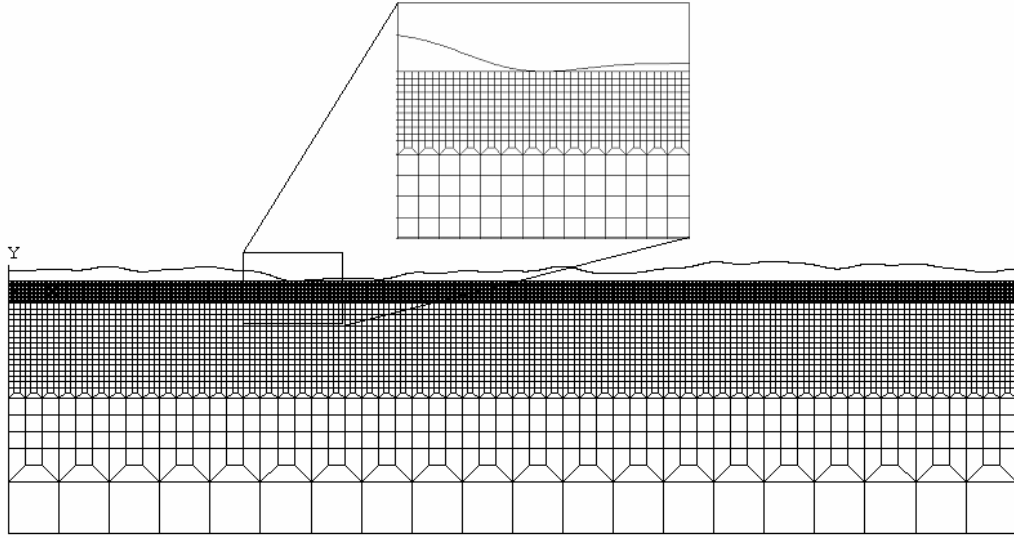
Bu çalışmada kullanılan rijit pürüzlü yüzey  $G=9.46 \times 10^{-4}$  nm,  $D=1.44$ ,  $\gamma=1.5$ ,  $L=4379$  nm parametreleri ve (1) eşitliği kullanılarak elde edilmiş ve şekil 1’ de gösterilmiştir. Öncelikle, verilen değerler için (1) eşitliğinin 0-6000 nm arasındaki grafiği elde edilmiştir. Ancak yüzey profilinden oluşan dalga uzunluklarını hesaba katmak için tüm hard-disk yüzeyinin yüksek mesh çözünürlüğü ile sonlu elemanlar modelinin yapılması pratik olmadığından; analizlerde kullanmak için bu 6000 nm ‘lik kısmı yeniden modelleyebilen 3400-3600 nm arasındaki pürüzlü yüzey seçilmiştir. Burada fraktal geometri ile yapılan yüzey modellemesi hakkında sınırlı bilgi verilmiş olup daha detaylı bilgi [15] referansından elde edilebilir.

### 3. SONLU ELEMANLAR MODELİ

Bu çalışmada, yüzey pürüzlülüğünün şekil değiştirme ve gerilmeler üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla; pürüzlü yüzey ile yarı-sonsuz ortamın temas analizi sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, fraktal geometri ile modellenmiş rijit pürüzlü yüzeyin homojen ve elastik-tam plastik pürüzsüz yarı-sonsuz ortam ile normal teması için 2-boyutlu bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Yarı sonsuz ortamın mekanik özellikleri çok yüksek yoğunluklu manyetik depolama aygıtlarının mekanik özelliklerine sahip olup, tablo 1 ‘ de verilirken [8], boyutları ise  $x=200$  nm ve  $y=50$  nm olarak alınmıştır. Sonlu elemanlar ağı şekil 2’ de verildiği gibi 9340 tane 2-boyutlu (2-B) 8-düğümmlü düzlem-şekil değiştirme yapısal isotropik elemanlar, 540 tane 2-B 3 düğümmlü yüzey-yüzey temas elemanları ve 100 tane 2-B rijit hedef elemanlarından oluşmuştur. Temas arayüzündeki en küçük elemanın boyu 0.370 nm ‘dir ve kare şeklindedir. Yarı-sonsuz ortamın düşey sınırlarındaki düğümler yatay doğrultudaki, alt kısımdaki düğümler ise düşey doğrultudaki yer değiştirmelere karşı sınırlandırılmıştır. Temas algoritması olarak ise Penalty Fonksiyonu Metodu kullanılmıştır. Yarı-sonsuz ortamın deformasyon davranışı için ANSYS ‘deki malzeme modellerinden BISO (Bilinear Isotropic Hardening) kullanılmıştır. Bu malzeme modeli, isotropik deformasyon sertleşmesi ile birlikte von Mises akma kriterini kullanır. Malzeme davranışı, pozitif gerilme ve şekil değiştirme değerleriyle orijinden başlayan iki-lineer gerilme-şekil değiştirme eğrisi ile verilir. Eğrinin ilk eğimi malzemenin elastisite modülü, ikinci eğimi ise tanjant modülü olarak alınır. İlk eğimden ikinci eğime geçme noktası ise akma gerilmesi olarak tanımlanır. Ancak bu çalışmada elastik-tam plastik malzeme modelini varsaymak amacıyla tanjant modülü sıfır yerine son derece küçük bir değer alınmıştır. Özellikle yüzeyin altındaki değerleri ayrıntılı öğrenmek amacıyla bu alanda ağ inceltilmesi yoluna gidilmiştir. Normal temas simülasyonları, rijit pürüzlü yüzeye yarı-sonsuz ortama doğru belli yer değiştirmeler (girişim) verilmek suretiyle çok-amaçlı sonlu elemanlar paket programı ANSYS Multyphysics kullanılarak yapılmıştır.

Mekanik Özellik	Değer
Elastisite Modülü, E [GPa]	130
Akma Gerilmesi, $\sigma_y$ [GPa]	2.67
Poisson Oranı	0.3

Tablo 1. Normal temas analizlerinde kullanılan yarı-sonsuz ortamın malzeme özellikleri [8]



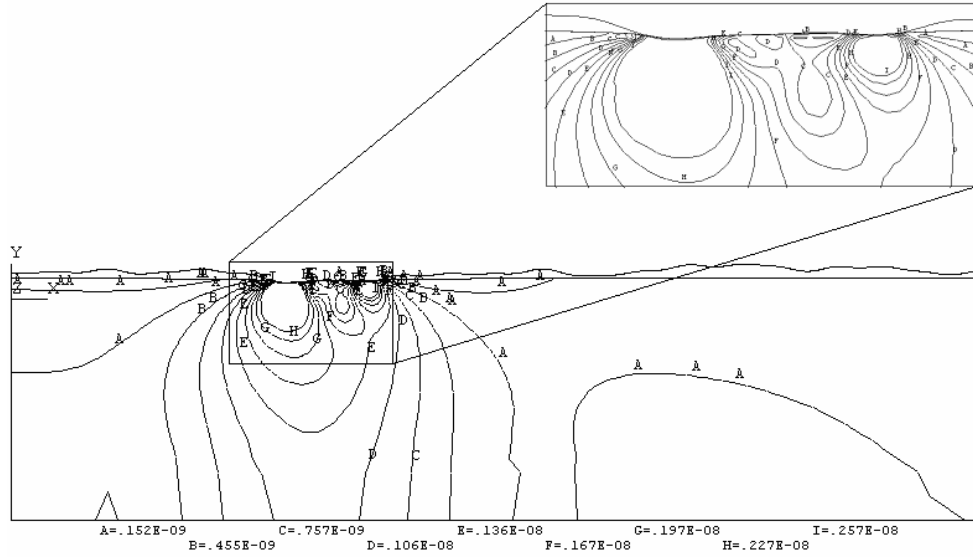
Şekil 2. Analizlerde kullanılan sonlu elemanlar modeli ve ağ yapısı.

#### 4. BULGULAR ve İRDELEME

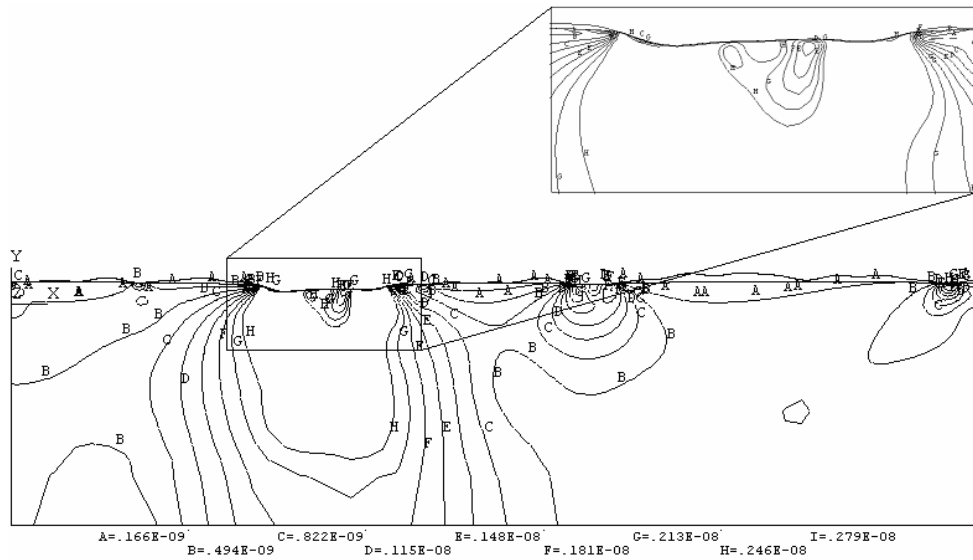
Normal temas analizleri için 1-2 nm ‘lik yüzey girişimleri kullanılmıştır. Şekil 3 ve 4 temas girişimi değerleri sırasıyla 1 nm ve 2 nm için von Mises eşdeğer gerilme dağılımlarını ve seçili bölgenin ayrıntısını göstermektedir. Temas girişimi miktarı 1 nm olduğunda mikrotemas sayısı iki tane iken; bu miktar 2 nm’ ye çıkartıldığında mikrotemas sayısı da buna bağlı olarak altıya çıkmaktadır. Temas girişimi miktarı 1 nm olduğunda mikrotemas yapan pürüzlerin altındaki gerilme alanının daha yoğun olduğu görülmektedir. Buna karşın, temas girişimi miktarı arttığında temas eden pürüz sayısı da arttığından hem yeni mikrotemaslar kurulmakta hem de temas alanı artmaktadır. Yeni kurulan mikrotemas alanlarında gerilmeler yine yoğun olmasına karşın daha önce kurulan mikrotemaslardaki gerilmeler artık temas yüzeyinin artmasıyla daha fazla dağılmakta ve yığılma önlenmektedir. Böylece de gerilme yığılması nedeniyle meydana gelebilecek plastik akma veya hasar oluşumunun önüne geçilmektedir.

Şekil 3’ deki mikrotemas alanının altındaki gerilme dağılımının dış çizgilerindeki gerilme değeri 1 GPa iken, iç bölgede yani en yoğun olan bölgede ise bu değer 2.7 GPa’ a çıkmaktadır. Şekil 4’ de girişim miktarı 2 nm’ ye çıkartıldığında aynı mikrotemas alanının altındaki gerilme alanının en dış çizgisindeki gerilme değeri bu defa 1.8 GPa değerine çıkmıştır. Oysa merkezdeki değer ise iki katından daha az bir değer yani 2.98 GPa değerini almaktadır. Bu da yukarıdaki, gerilme yığılmasının önlendiği ifadesini doğrulamaktadır.

Şekil 5 ve 6, girişim değerleri sırasıyla 1 nm ve 2 nm için eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı ve seçili bölgenin ayrıntısını göstermektedir. Temas girişimi miktarı 1 nm olduğunda şekil 5’ den az da olsa plastik şekil değiştirmenin başladığı görülmektedir. Plastik şekil değiştirmenin meydana geldiği yer ilk temas eden mikro pürüz bölgesindeki yarı-sonsuz ortamın yüzeyi altında meydana gelmektedir.



Şekil 3. Temas girişimi değeri  $\delta=1$  nm için yarı-sonsuz ortam yüzeyindeki von Mises eşdeğer gerilme dağılımı ve seçili bölgenin ayrıntısı

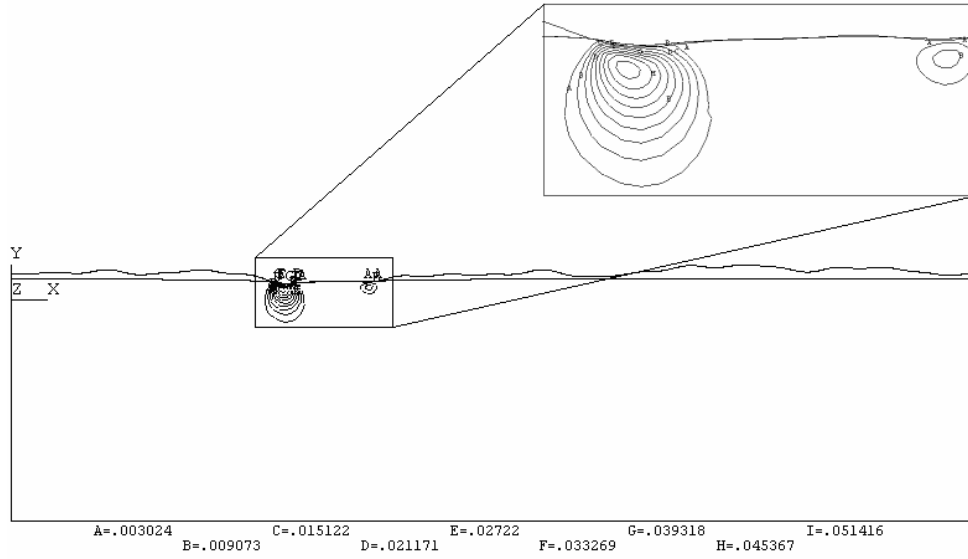


Şekil 4. Temas girişimi değeri  $\delta=2$  nm için yarı-sonsuz ortam yüzeyindeki von Mises eşdeğer gerilme dağılımı ve seçili bölgenin ayrıntısı

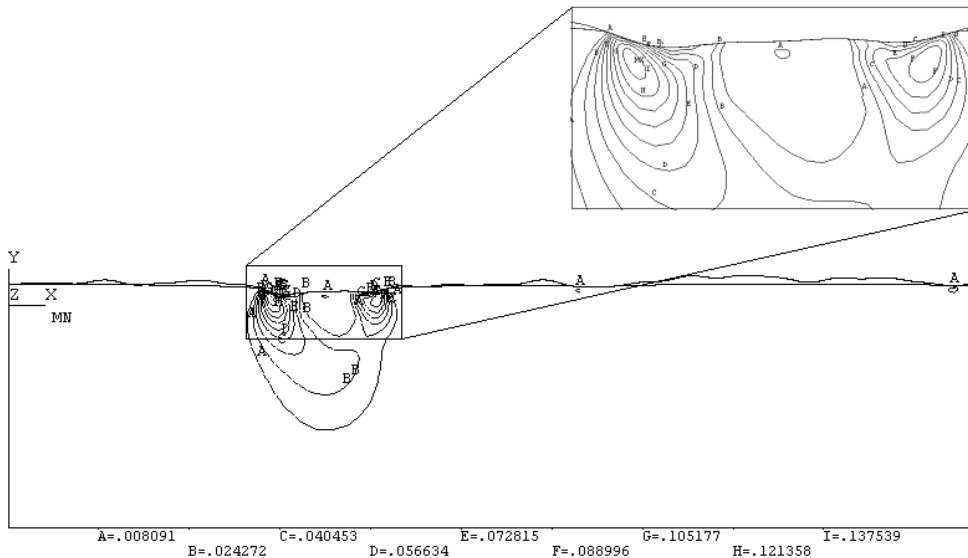
Maksimum temas girişimi miktarı 2 nm' ye artırıldığında temas eden pürüz sayısı iki katına çıkmakta; bununla birlikte plastik şekil değiştirme ise yaklaşık üç katına çıkmaktadır. Temas girişimi miktarı artırıldığında plastik şekil değiştirmenin sadece mikrotemas bölgesinin hemen altında değil diğer temas ara yüzeyinde de meydana geldiği görülmektedir. Şekil 7 ve 8 temas girişimi değerleri sırasıyla 1 nm ve 2 nm için temas basıncı dağılımlarını ve seçili bölgenin ayrıntısını göstermektedir. 7 numaralı şekilde iki bölgede pürüz mikroteması oluşurken girişim miktarının artırılmasıyla mikrotemas yapan pürüz sayısı artmış ve buna karşılık temas alanları da artmıştır. Şekil 8' de temas girişimi miktarı 2 nm' ye çıktığında sonradan oluşan mikrotemaslardan en sağdaki çiftteki basınç değerinin son derece yüksek olduğu

görülmektedir (72.9 GPa). Bunun sebebi ise yeni kurulan bu mikro temasta, pürüzün çok keskin ve sivri olması ve dolayısıyla temas alanının çok küçük olması sebebiyle basıncın burada yoğunlaşmasıdır. Diğer taraflarda ise mikrotemas alanının artmasıyla birlikte yükün paylaşımı gerçekleştiğinden basınçlar fazla yükselememiştir.

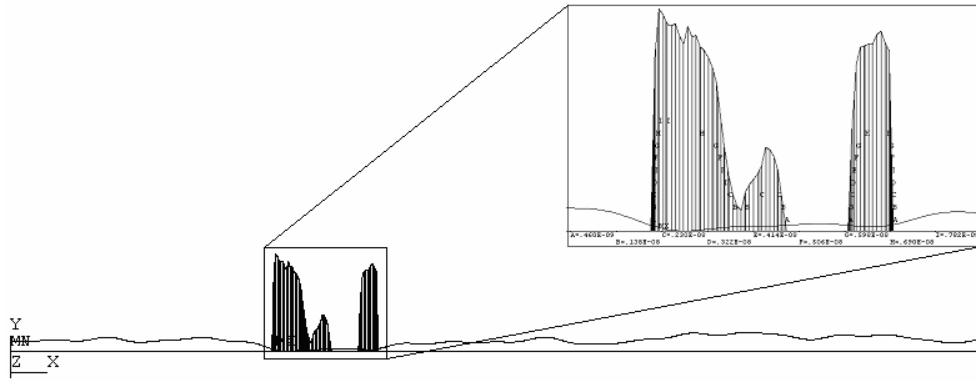
Temas basıncı dağılımlarından görüldüğü gibi; temas eden pürüzlü yüzey fraktal geometri ile modellenmiş ve rasgele bir yapıya sahip olduğundan elde edilen basınç dağılımında da simetriklik veya belli bir kurala uyma durumu söz konusu değildir. Ayrıca bu durum meydana gelebilecek bir plastik şekil değiştirmenin, özellikle yüksek basınç gösteren mikrotemas bölgelerinde olabileceği sonucunu ortaya çıkarmaktadır.



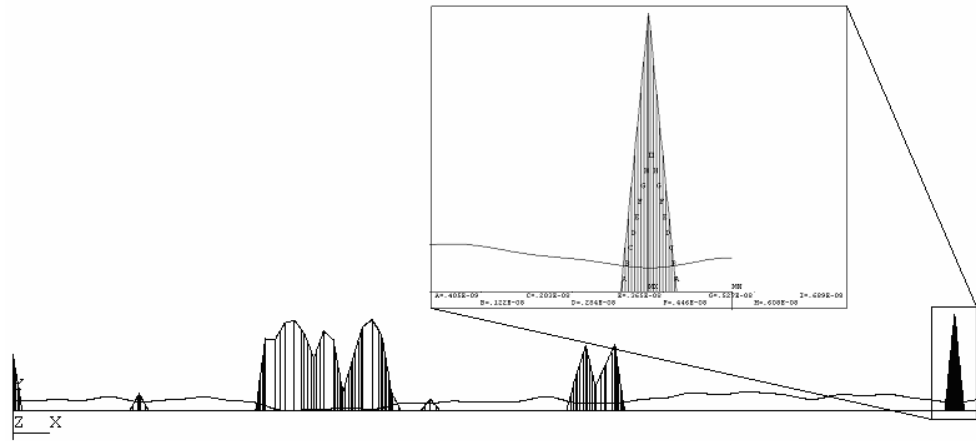
Şekil 5. Temas girişimi değeri  $\delta=1$  nm için yarı-sonsuz ortam yüzeyindeki eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı ve seçili bölgenin ayrıntısı



Şekil 6. Temas girişimi değeri  $\delta=2$  nm için yarı-sonsuz ortam yüzeyindeki eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı ve seçili bölgenin ayrıntısı



Şekil 7. Temas girişimi değeri  $\delta=1$  nm için temas ara yüzündeki temas basıncı dağılımı ve seçili bölgenin ayrıntısı



Şekil 8. Temas girişimi değeri  $\delta=2$  nm için temas ara yüzündeki temas basıncı dağılımı ve seçili bölgenin ayrıntısı

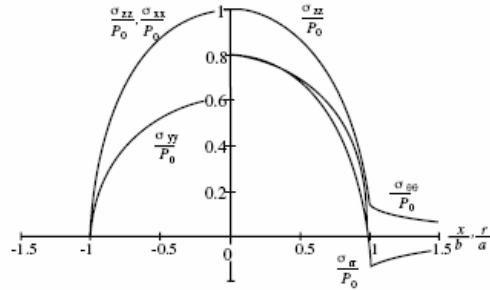
Burada verilen bütün şekillerden kolaylıkla görüldüğü gibi, pürüz yoğunluğu ne kadar fazla olursa; yani pürüzler birbirlerine ne kadar yakın olursa temas ettikleri ortamlardaki gerilme veya şekil değiştirme dağılımları o denli düzgün olmakta ve yığılmalar azalmaktadır. Böylece, bu tür ortamlardaki gerilme yığılması nedeniyle meydana gelebilecek çatlak oluşumu riski de azalmaktadır.

Normal temas analizi sonrasında elde edilecek gerilme ve şekil değiştirme dağılımlarını etkileyen faktörlerden birisi de pürüz uçlarının geometrisidir. Pürüzlerin normal temas doğrultusundaki uzunluk farkları fazla olduğunda ve özellikle pürüz uçları keskin veya sivri olduğunda temas ettikleri ortam üzerinde yine gerilme yığılması etkisi yapmaktadırlar. Böylece o yüzeyde malzeme akışı ve çatlak oluşumu meyli de artmaktadır.

Pürüzlü yüzeyleri modellemek için pürüz ucu geometrisi olarak silindirik (küresel), elipsoid, sinüzoidal vs. gibi basit ve gerçekçi olmayan (keskin veya sivri uçlu olmayan) geometriler kullanılan çalışmalarda, gerçekçi gerilme veya şekil değiştirme dağılımlarının yerine



mikrotemas arayüzeyinde düzgün ve simetrik dağılımlı gerilme ve şekil değiştirme alanları elde edilmektedir (şekil 9). Oysaki gerçekte, temas eden pürüzlü yüzeylerin pürüz uçları son derece düzensiz, keskin, sivri vs. olabilmektedir. Bu da ancak pürüzlü yüzeyleri fraktal geometri ile modellemekten geçmektedir.



Şekil 9. Hertz teması (sağ taraf) ve çizgisel temas (sol taraf) nedeniyle yüzeyde meydana gelen gerilme dağılımları.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada mekanik yüzey yüklerinin yarı-sonsuz ortamda oluşan von Mises eşdeğer gerilmesi, eşdeğer elastik-plastik şekil değiştirmeleri ile basınç değerleri üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Ayrıca, rijit pürüzlü yüzeyin yarı-sonsuz ortam içindeki temas derinliği miktarının (girişim) şekil değişimine etkisi de incelenmiştir. Fraktal geometri kullanarak geliştirilen ve böylece pürüz etkileşimlerinin de dikkate alındığı daha gerçekçi bu yüzey modelinin, gerilme ve şekil değiştirme dağılımları üzerindeki etkisi diğer modellerle karşılaştırmalı olarak irdelenerek geçerliliği araştırılmıştır. Fraktal geometri kullanarak yapılan analizler sonucunda gerilme, şekil değiştirme ve basınç değerleri için elde edilen dağılımların diğer yüzey modellerine göre son derece gerçekçi olduğu görülmüştür.

Bu çalışma ile yüzey pürüzlülüğünün temas basıncı, gerilmeler ve şekil değiştirmeler üzerinde önemli bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada pürüzlü yüzeyleri daha gerçekçi olarak modelleyebilen fraktal geometri kullanılmak suretiyle elde edilen mekanik analiz bulguları, literatürde yüzey pürüzlülüğünü idealleştirerek yapılan çalışmalardan farklı sonuçlar vermiştir. Geliştirilen fraktal geometrili pürüzlü yüzey, daha önce yapılan çalışmalardan farklı olarak gerçekte olduğu gibi simetrik olmayan rasgele bir yapıda olduğundan elde edilen gerilme, temas basıncı ve şekil değiştirme dağılımları da simetrik olmayan, rasgele bir düzende elde edilmiştir. Oysa, literatürde yapılan çalışmalarda yüzey pürüzlülükleri şekli bilinen (silindirik, eliptik, sinüzoidal, vs.) idealleştirilmiş dağılımlar ile verildiğinden, elde edilen gerilme, temas basıncı ve şekil değiştirme dağılımları da yine Hertz temasında olduğu gibi idealleştirilmiş yaklaşık değerleri veren dağılımlardır. Bu nedenle, fraktal geometri ile modellenmiş yüzeyler ile yapılan analizler sonucunda elde edilen gerilme, temas basıncı ve şekil değiştirmelerin çok daha gerçekçi dağılımlara sahip olduğu söylenebilir.

Fraktal dağılımlı yüzeyin oluşturduğu gerilme dağılımında yüzeydeki gerçekçi pürüzler ideal pürüzler gibi silindirik veya eliptik değil de sivri, keskin kenarlı ve düzensiz şekilli olduğundan, elde edilen gerilme dağılımı da yine bu şekilde düzensiz, asimetrik ve rasgele

olmakta ve gerilmeler de temas ettiği bölgede daha küçük alanlara etkidinden daha yoğun olmaktadır. Dolayısıyla, fraktal geometri ile elde edilen dağılımda gerilme yığılması ve sonrasında bu yığılmanın plastik akmaya sebebiyet verip çatlak oluşumuyla sonuçlanabileceği görülürken; pürüzlülüğu idealleştirilen yüzey ile düzenli ve simetrik bir dağılım elde edilip bu tür sonuçlar görülemeyeceğinden; sonrasında oluşabilecek hasarların da fark edilmesi mümkün olmayacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] Bowden, F.P. ve Tabor, D., “Friction and Lubrication of Solids” Vol II Oxford University Pres London-1964.
- [2] Nayak, P.R., “Random Process Model of Rough Surfaces” Journal of Lubrication Technology Trans. of ASME 97 398-407, 1971.
- [3] Greenwood, J.A ve Williamson, J.B.P., “Contact of Nominally Rough Surfaces” Proc. of R. Soc. London A 295 300-319, 1966.
- [4] McCool, J.I., “Comparison of Models for the Contavt of Rough Surfaces” Wear 107 37-60., 1986.
- [5] Thomas, T.R., “Rough surfaces” Longman London-1982.
- [6] Bhushan, B., Wyant, J.C., ve Meiling, J., “A New Three-Dimensional Digital Optical Profiler” Wear 122 301-312, 1988.
- [7] Mandelbrot, B. B., “The Fractal Geometry of Nature” Freeman New York NY-1983.
- [8] Komvopoulos, K., “Head-Disk Interface Contact Mechanics for Ultrahigh Density Magnetic Recording” Wear 238 1-11, 2000.
- [9] Komvopoulos, K., ve Ye, N., “Elastic-Plastic Finite Element Analysis for the Head-Disk Interface With Fractal Topography Description” Journal of Tribology ASME Trans. Vol. 124 No. 4 pp. 775-784, 2002.
- [10] Majumdar, A. ve Bhushan, B., “Fractal Model of Elastic-Plastic Contact Between Rough Surfaces” ASME J. Tribology 113 1-11, 1991.
- [11] Wang, S. ve Komvopoulos, K., “A Fractal Theory of The Interfacial Temperature Distribution in the Slow Sliding Rejime: Part I- Elastic Contact and Heat Transfer Analysis” ASME J. Tribology 116 812-823, 1994a.
- [12] Wang, S. ve Komvopoulos, K., “A Fractal Theory of The Interfacial Temperature Distribution in the Slow Sliding Rejime: Part II- Multiple Domains, Elastoplastic Contacts, and Appications” ASME J. Tribology 116 824-832, 1994b.
- [13] Wang, S. ve Komvopoulos, K., “A Fractal Theory of the Temperature Distribution at Elastic Contacts of Fast Sliding Surfaces” ASME J. Tribology 117 203-215, 1995.
- [14] Yan, W. ve Komvopoulos, K., “Contact Analysis of Elastic-Plastic Fractal Surfaces, Journal of Applied Mechanics” 84 3617-3624, 1998.
- [15] Özer, A., “Mechanical and Thermomechanical Analysis of Elastic-Plastic Semi-Infinite Medium in Sliding Contact with Fractal Surface” Ph.D. Dissertation Karadeniz Technical University – Trabzon-2006.